

# 太湖悬浮质对湖面反照率及水体光吸收的影响\*

蔡启铭 杨平

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 210008)

**提要** 本文根据 Mie 散射理论,利用太湖水中悬浮质粒径谱分布的实测资料,计算了湖水的光散射相矩阵、消光系数和吸收系数等光学参量,并采用 Monte Carlo 方法,研究了湖面反照率和水体光吸收以及太阳高度角、入射光波长、底泥反射、悬浮质浓度和粒径分布变化的影响。数值计算结果表明:在研究湖泊水体对太阳辐射能量的反射和吸收时,水中悬浮质是一个不可忽视的重要因素。

研究水体光学所涉及的最基本物理量是湖面反照率和水体吸收率,它们直接反映了入射光能量被水体反射和吸收的多少。迄今,国外在这一领域已开展了不少实验和理论工作<sup>[1]</sup>,但在我国,水体光学尚属薄弱环节,特别是从物理学基本定律出发,定量地研究包括水体散射光强度和偏振性质在内的工作还很少报道。

由于水中悬浮质和水分子对入射光的多次散射以及底泥的反射效应,湖面反照率不同于 Fresnel 定律计算的结果。本文利用 Monte Carlo 方法模拟光子的随机飞行过程,从理论上研究水中悬浮质的散射和吸收对湖面反照率和水体吸收率的影响。计算中使用了实测的太湖悬浮质粒度资料,考虑了水分子的散射和吸收。本文的数值计算中,视湖面为平面。

## 一、太湖实测悬浮质的分布

湖水中悬浮质的浓度和粒径分布直接影响着水体表观光学性质,是数值计算中必须考虑的变化因素。1987年中、日太湖与琵琶湖合作研究期间,曾对太湖悬浮质的百分重量随粒径  $\phi$  的分布函数  $P(\phi)$  及其随深度的变化进行了较详细的观测。观测资料表明,虽然  $P(\phi)$  随季节、时间、采样地点和深度变化很大,但总的来说,可用三段正态分布来拟合,即

$$P(\phi) = \sum_{i=1}^3 \int_{\phi_{i-1}}^{\phi_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} dx \quad (1)$$

式中,  $\mu_i, \sigma_i$  为正态分布的参数;  $\phi$  为无量纲量,  $\phi = -\log_2 D$ ,  $D$  为粒子的等效球体直径

\* 国家自然科学基金资助项目 (No. 4880207)。龚骥同志提供太湖悬浮质实测资料并给予指导,深致谢忱。  
收稿日期: 1989年10月30日。

(mm);  $\phi_{i-1}$  和  $\phi_i$  决定了三段分布的分段区间, 可取  $\phi_0 = -\infty$ ,  $\phi_3 = \infty$ , 而  $\phi_1$  和  $\phi_2$  则根据具体资料确定。本文计算中使用 7 月月平均和 7 月 18 日实测资料, 得到的分段区间和分布参数见表 1。

表 1 太湖悬浮质分布的分段区间与分布参数

Tab. 1 Interval and parameters of distribution of suspended particles in Taihu Lake

粒径	$\phi \leq 5.06$		$5.06 < \phi \leq 7.97$		$\phi > 7.97$	
	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$
7 月月平均	6.26	1.48	7.37	2.85	7.35	2.95
7 月 18 日	5.80	0.92	6.52	1.81	4.59	4.21

在计算悬浮质光学特性时需要知道粒子的数量随粒径的分布函数  $n(\phi)$ ,  $n(\phi)$  可由  $P(\phi)$  导出:

$$\frac{dn(\phi)}{d\phi} = \frac{6}{\pi} \cdot 2^{3\phi} \frac{\rho_s}{\rho_a} \frac{dP(\phi)}{d\phi} \quad (2)$$

式中,  $\rho_a$  为构成悬浮物质的密度, 对于太湖, 可取  $\rho_a = 2.56 \text{g/cm}^3$ ;  $\rho_s (\text{g/cm}^3)$  是水中悬浮质的浓度, 一般  $\rho_s$  沿水平方向变化很小, 可只考虑其垂直变化, 太湖悬浮质浓度随水深度的变化可用下面关系表示:

$$\rho_s = \rho_0 e^{kz}, \quad (3)$$

式中,  $z$  表示深度,  $z$  的单位取 cm 时,  $k = 0.006 \text{cm}^{-1}$ ,  $\rho_0 = 78.3 \text{g/cm}^3$ 。

## 二、太湖悬浮质的散射参量

尽管湖中不同的悬浮粒子, 其几何形状和折射率不同, 但作为群体效应, 湖中悬浮质的散射参量可用等效球形粒子来计算。悬浮质中, 二氧化硅等矿物质的折射率较大, 而藻类、有机碎屑折射率较小, 吸收主要由有机质决定, 因此折射率可取各种悬浮粒子的综合平均值<sup>[2,3]</sup>。本文计算中选取如下平均折射率(相对于水):

$$m = 1.15 - i0.001, \quad i = \sqrt{-1}。$$

完全描述光的性质, 需用 4 个 Stokes 参量。对球形粒子、入射光和散射光的 Stokes 参量由下面散射相矩阵进行变换:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{bmatrix} = \frac{1}{r^2} \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & 0 & 0 \\ \beta_{12} & \beta_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{33} & \beta_{34} \\ 0 & 0 & -\beta_{34} & \beta_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $I, Q, U, V$  即为 4 个 Stokes 参量, 脚标  $s$  表示散射参量, 脚标  $i$  表示入射参量;  $r$  为散射距离;  $\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{33}$  和  $\beta_{34}$  为强度变换矩阵元素, 可用下式计算:

$$\begin{cases} \beta_{11} = \frac{1}{2k^2} (S_1 \cdot S_1^* + S_2 \cdot S_2^*) \\ \beta_{12} = \frac{1}{2k^2} (S_2 \cdot S_2^* - S_1 \cdot S_1^*) \\ \beta_{33} = \frac{1}{2k^2} (S_2^* \cdot S_1 + S_2 \cdot S_1^*) \\ \beta_{34} = \frac{i}{2k} (S_1 \cdot S_2^* - S_2 \cdot S_1^*), \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为波长; \* 表示复共轭;  $S_1$  和  $S_2$  称为振幅散射矩阵元素<sup>[5]</sup>, 根据 Mie 散射理论, 它们是散射角  $\theta$ 、粒子折射率  $m$ 、粒子大小  $\phi$  和波长  $\lambda$  的函数。因此  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{33}$ ,  $\beta_{34}$  描述了散射光的能量和偏振性质的角分布特征。

单个粒子的散射截面和消光截面则根据下式计算:

$$\begin{cases} \sigma_s = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \\ \sigma_e = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)\text{Re}(a_n + b_n) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $a_n$  和  $b_n$  是  $S_1$  和  $S_2$  级数表达式中的展开系数。于是, 单位体积水体中粒子群的散射相矩阵元素, 散射和消光系数便可求得:

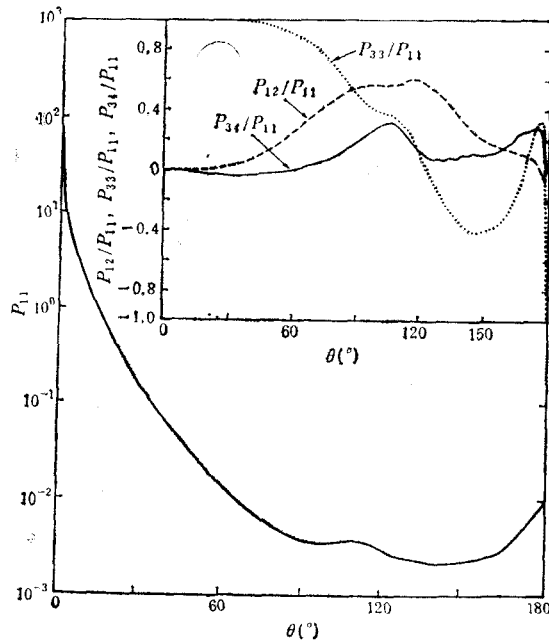


图 1 太湖悬浮质的光散射相矩阵非零元素  
Fig. 1 Non-zero elements of light scattering phase matrix of suspended particle for Taihu Lake

$$\begin{cases} \bar{\beta}_{ij} = \int_{-\infty}^{\infty} \beta_{ij}(\theta, \phi) \frac{dn(\phi)}{d\phi} d\phi, & i, j = 1, 2, 3, 4 \\ \bar{\sigma}_{s,e} = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{s,e}(\phi) \frac{dn(\phi)}{d\phi} d\phi \end{cases} \quad (7)$$

$\bar{\beta}_{ij}$  和  $\bar{\sigma}_{s,e}$  随水深的变化也可用(3)式的指数变化形式表示:

$$\begin{cases} \bar{\beta}_{ij} = P_{ij} e^{kz} & i, j = 1, 2, 3, 4 \\ \bar{\sigma}_{s,e} = Q_{s,e} e^{kz} \end{cases} \quad (8)$$

图 1 是  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$  时根据 7 月月平均悬浮质资料计算得到的  $P_{ij}$ 。由图 1 可见,太湖悬浮质的前向散射很强;  $P_{11}$  在散射角  $100-120^\circ$  范围仅出现弱峰区,说明悬浮质中远大于波长的粒子所占比例很小。而  $-P_{12}/P_{11}$  (表示散射光的偏振度) 较大的区域出现在散射角  $90-130^\circ$  的侧向。

### 三、Monte Carlo 计算方法

对于包括水-气界面的水体光学问题,由于水面的存在和悬浮质散射的非各向同性,给精确求解辐射传输方程带来很大困难,为此我们采用 Monte Carlo 方法。它是一种随机模拟方法,数学上,是将散射过程视为一种随机过程,按一定的概率分布进行抽样统计;物理上则是用计算机模拟、追踪光子与水分子、悬浮粒子以及水面和底泥的随机碰撞事件,然后对大量光子的情况进行统计而得到结果。

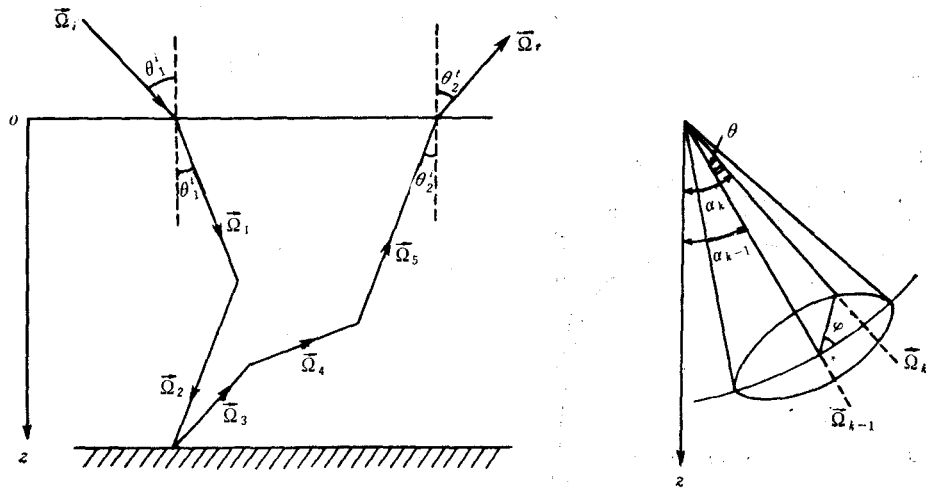


图 2 光子追踪示意图  
Fig. 2 Scheme of photon trace

图 2 为一个光子可能的飞行路径,  $\bar{\Omega}_K$  ( $K = 1, 2, \dots$ ) 为水中光子在各次碰撞事件之前的飞行方向。首先,光子入射到湖面,反射的概率为

$$r = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\text{tg}^2(\theta_i - \theta_t)}{\text{tg}^2(\theta_i + \theta_t)} \right] \quad (9)$$

式中,  $\theta_i$  和  $\theta_t$  分别为入射角和折射角。

进入水体的光子将和水分子或悬浮粒子碰撞,以  $(0, 1)$  内均匀分布的随机数  $\xi$  表示光

子在两次碰撞间飞越距离  $\Delta z = z_{K+1} - z_K$  的几率,显然有

$$\int_{z_K}^{z_{K+1}} (\bar{\sigma}_{es} + \bar{\sigma}_{ew}) dz / \mu_K = -\ln \xi \quad (10)$$

式中,  $\mu_K = \cos \alpha_K$ ,  $\alpha_K$  为  $\vec{D}_K$  与  $z$  轴正向的夹角,有

$$\cos \alpha_K = \cos \alpha_{K-1} \cos \theta - \sin \alpha_{K-1} \sin \theta \cos \varphi, \quad (11)$$

散射角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  满足

$$\begin{cases} \xi = \int_0^\theta \beta_{11}(x) \sin x dx / \int_0^\pi \beta_{11}(x) \sin x dx \\ \varphi = 2\pi\xi \end{cases} \quad (12)$$

根据抽样理论,若

$$\xi \leq (\bar{\sigma}_{es} + \sigma_{sw}) / (\bar{\sigma}_{es} + \sigma_{ew}), \quad (13)$$

则光子碰撞为散射事件,否则为吸收事件。若

$$\xi \leq \sigma_{sw} / (\sigma_{sw} + \bar{\sigma}_{es}) \quad (14)$$

则散射为水分子散射,否则光子被悬浮质散射。式中,  $\bar{\sigma}_{es}$  和  $\sigma_{ew}$  为悬浮质和水分子的消光系数,  $\bar{\sigma}_{es}$  和  $\sigma_{sw}$  为散射系数。对于水分子的吸收系数,本文采用 Smith 等的数值<sup>[7]</sup>,其散射函数用下述形式<sup>[8]</sup>:

$$\beta_{11}^w(\theta) = 7.028 29\lambda^{-4.32} (1 + 0.835 \cos^2 \theta) \times 10^{-6} \quad (15)$$

波长  $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位时,  $\beta_{11}^w$  的单位为  $\text{m}^{-1}$ 。

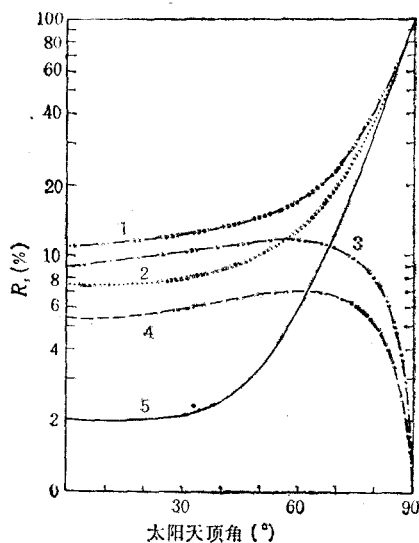


图3 利用实测悬浮质计算的太湖湖面反照率( $R_s$ )  
Fig. 3 Albedo of Taihu Lake surface computed from measured suspension

1. 悬浮质为7月平均谱时的湖面  $R_s$ ; 2. 悬浮质为7月18日谱时的  $R_s$ ; 3. 悬浮质为7月平均谱时水体多次散射的贡献; 4. 悬浮质为7月18日谱时水体多次散射的贡献; 5. 湖面 Fresnel 反射。

对于底泥, 设其反射率为  $A_R$ , 若  $\xi \leq A_R$ , 光子被反射, 否则被吸收。若底泥为漫反射, 则反射后满足:

$$\cos \alpha_K = \xi - 1, \quad (16)$$

当光子由水体飞向水面时, 若  $\sin \theta_i \geq \frac{1}{m}$ , 还需要考虑全反射效应。

数值计算中, 为提高精度本文采用了减小方差的技巧, 对光子赋以能量统计权重因子, 强迫光子每次碰撞为散射事件, 光子被吸收事件发生的概率纳入光子能量权重因子在碰撞中的变化<sup>[9]</sup>。

## 四、结果和讨论

湖面入射总辐射包括太阳直接辐射和天空漫辐射, 下面分别加以讨论。

### 1. 太阳直接辐射

图3给出了波长为  $0.55 \mu\text{m}$ , 底泥无反射时, 太阳直接辐射的计算结果。可见在太阳天顶角小时, 多次散射的贡献很大, 在天顶角  $0-50^\circ$ , 其值几乎不变。随着太阳天顶角增加, Fresnel 反射急剧加大, 当大于  $80^\circ$  时, 多次散射贡献可忽略。此外, 悬浮质粒径分布

对反照率 ( $R_s$ ) 有明显影响。对前述月平均谱分布, 大粒子的比例较大, 其散射和消光系数也大, 因而多次散射对湖面反照率的贡献也比 7 月 18 日的情况更大。

图 4 为不考虑悬浮质时的反照率和吸收率。计算中取太湖平均水深为 2m。比较图 4a 无底泥反射时的曲线与图 3 的曲线 5, 两者相差甚微, 可见纯水主要呈现为吸收介质, 水分子的多次散射可以忽略。比较图 4 各条曲线可看出, 在没有悬浮质的情况, 由于湖水透明度增大, 底泥反射作用明显,  $R_s$  和  $A_s$  明显加大。

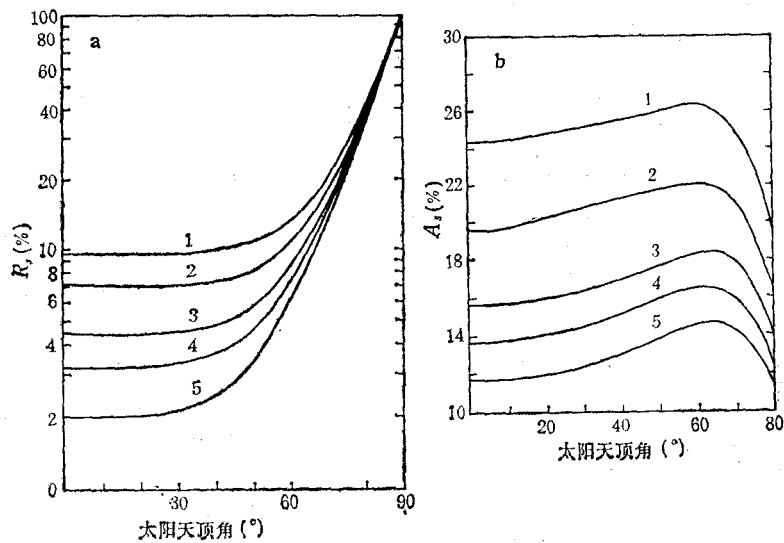


图 4 无悬浮质时的湖水反照率 (a) 和吸收率 (b)

Fig. 4 Computed albedo (a) and absorption rate (b) of lake water without suspended particle

1.  $A_R = 30\%$ ; 2.  $A_R = 20\%$ ; 3.  $A_R = 10\%$ ; 4.  $A_R = 5\%$ ; 5.  $A_R = 0\%$

表 2 太湖水体的光学参数 ( $\text{cm}^{-1}$ )

Tab. 2 Optic coefficients of size distribution 1 and 2 ( $\text{cm}^{-1}$ )

光学参数	$Q_s$	$Q_d$
7 月月平均	0.094 7	0.097 7
7 月 18 日	0.068 1	0.071 8

图 5 为不同悬浮质浓度时的情况,  $C_0$  为浓度因子, 计算时的浓度等于真实浓度乘以  $C_0$ 。在悬浮质浓度较小时,  $R_s$  和  $A_s$  对浓度的变化反应敏感, 但随着浓度的增加, 它们趋于一极限曲线, 因为此时某一深度以下的水体对湖面反照率的贡献很小。

图 6 给出了不同波长情况的直接太阳辐射的  $R_s$  和  $A_s$ 。随着波长的增加,  $R_s$  减小,  $A_s$  增大。这主要由光学参量  $Q_s$  和  $Q_d$  决定(表 2)。

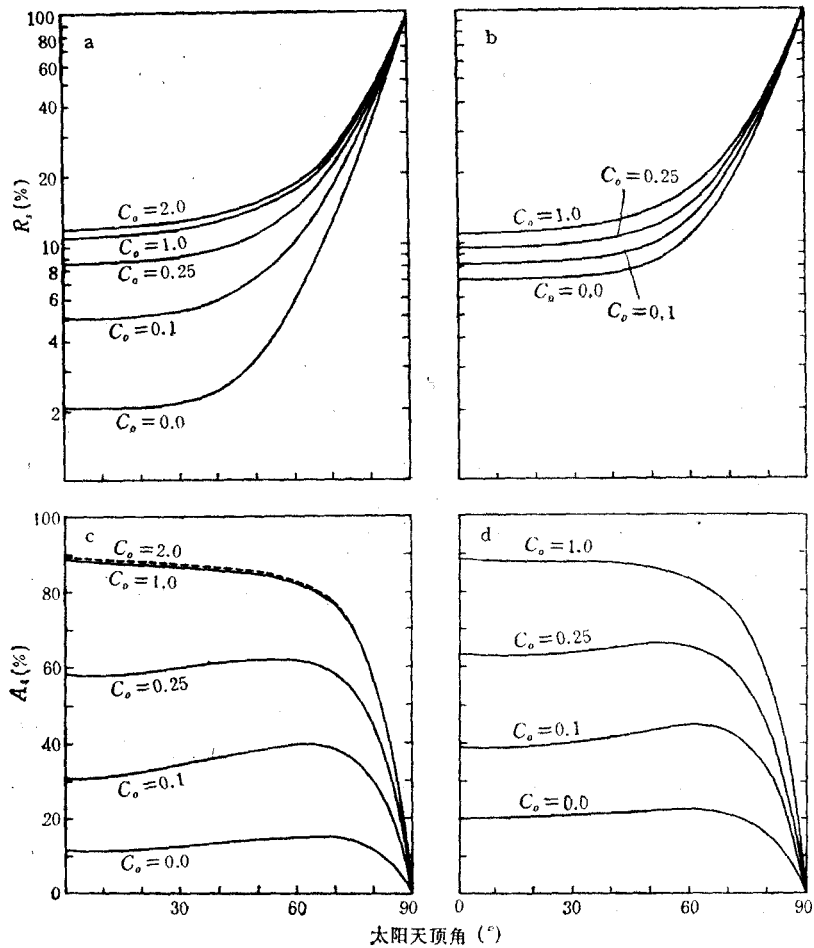


图 5 不同悬浮质浓度和底泥反射时的湖面反照率和吸收率  
 Fig. 5 Albedo and absorption rate of lake surface with different suspension concentrations and bottom reflection  
 a.  $A_R = 0\%$ ; b.  $A_R = 20\%$ ; c.  $A_R = 0\%$ ; d.  $A_R = 20\%$

## 2. 漫射辐射

入射到湖面的总辐射中还包括天空漫射辐射, 它所占比例取决于大气中云和气溶胶分布, 计算中考虑了两种情况: 在天空漫射辐射为各向同性的条件下, 光子的人射方向由下式进行抽样

$$\cos \theta_i = \xi^{1/2}, \quad (17)$$

在天空全部被云遮蔽的情况下, 天空亮度可用心脏线描述<sup>[2]</sup>, 此时入射角抽样方程为

$$(3\cos^2\theta_i + 4\cos^4\theta_i)/7 = \xi \quad (18)$$

当  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ , 底泥无反射时, 对于 7 月月平均资料, 均匀漫射的计算结果为反射率  $R_d = 16.8\%$ , 吸收率  $A_d = 82.4\%$ , 心脏线分布时,  $R_d = 15.6\%$ ,  $A_d = 83.5\%$ , 可见两种分布的计算结果相差不大。

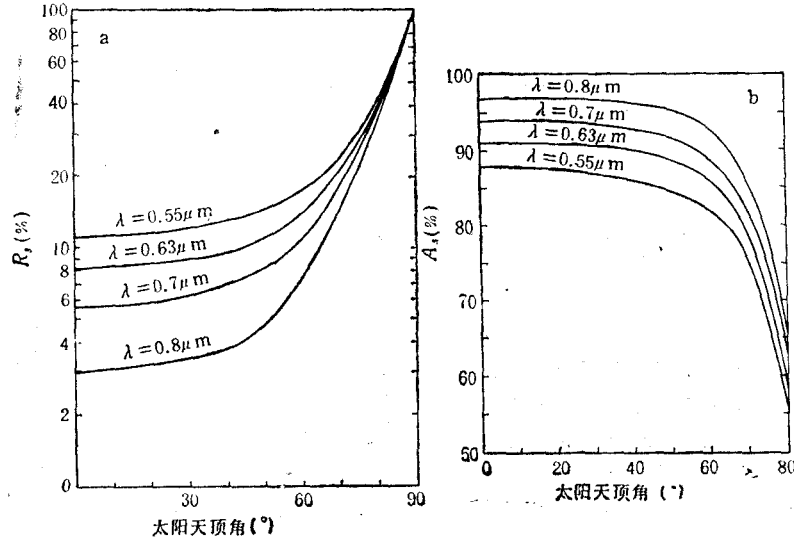


图 6 不同波长光的湖面反照率(a)和水体吸收率(b)

Fig. 6 Albedo of lake surface and absorption rate of water body with different wavelength

## 五、结 论

通过对太湖湖面反照率和水体吸收率的计算表明：(1) 太湖悬浮质是一个必须考虑的因素，而水分子的影响主要表现在吸收方面。(2) 对于  $R_s$ ，太阳天顶角较小时，应考虑水中多次散射的贡献，天顶角很大时可用 Fresnel 反射近似。(3)  $R_s$  和  $A_s$  均随悬浮质浓度、底泥反射和波长的不同而改变，悬浮质少时，底泥作用明显， $R_s$  和  $A_s$  的变化也敏感；悬浮质浓度增大， $R_s$  和  $A_s$  均趋于某一稳定值。

## 参 考 文 献

- [1] 裴鹿成、张孝泽, 1980. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用. 科学出版社, 56—78, 85—87, 163—213 页。
- [2] Jerlov, N. G. 著, 1981. 海洋光学(赵俊生、吴曙初译). 科学出版社, 8, 29, 33—51, 83 页。
- [3] Carder, K. L., R. D. Tomlinson and F. B. Jr. George, 1972. A technique for the estimation of indices of refraction of marine phytoplanktons. *Limnol. Oceanogr.* 17: 833—939.
- [4] Kirk, J. T. O., 1983. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, Britain, pp. 12—20.
- [5] Liou, K. N., 1980. An introduction to atmospheric radiation. Academic Press, New York, pp. 122—175.
- [6] Morel, A., 1974. Optical properties of pure water and pure seawater. In optical aspects of oceanography, Academic Press, pp. 1—24.
- [7] Smith, R. C. and K. S. Baker, 1981. Optical properties of the clearest natural waters (200—800 nm). *Appl. Opt.* 20: 177—181.



## EFFECTS OF SUSPENDED PARTICLES IN TAIHU LAKE ON ALBEDO AND ABSORPTION

Cai Qiming and Yang Ping

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Academia Sinica, 210008*)

### ABSTRACT

The observed size distribution of suspended particles in Taihu lake are used, their light scattering phase matrices and extinction and scattering coefficients are computed by using Mie theory in this paper. Moreover, in terms of Monte Carlo method, the lake surface albedo and absorption of water body are investigated and the effects of solar zenith angle, the incident light wavelength, the reflection of lake bottom and the concentration and size distribution of the particles are also studied. The results show that the suspended particles in the lake can not be ignored in the study of reflection and absorption of water body, particularly when solar zenith angle is low and concentration of suspension is high. Their multiscattering contribution may be up to six-fold larger than Fresnel reflection of surface and, on the contrary, the effect of water molecules appears mainly in the absorption. In addition the albedo and absorption also vary with incident light wavelength and size distribution of particles. The influences of bottom mud are evident only when water is clear.